

# 不平衡输入-平衡输出结构射频声表面波滤波器设计

杜雪松, 金 中, 陈婷婷, 罗山焱, 姚 远, 肖 立, 曹 亮

(中国电子科技集团公司第26研究所, 重庆 400060)

**摘 要:**在某些情况下, 电路运用中需要用到不平衡输入-平衡输出结构的滤波器, 该文基于三端口网络混合模 S 参数的原理, 结合声表面波器件设计的 COM 模型, 用 ADS 设计了 Crf+Resonator 混合结构的不平衡输入-平衡输出声表面波射频滤波器, 该滤波器的仿真结果和实测结果吻合较好。

**关键词:**不平衡输入-平衡输出; 混合模 S 参数; 声表面波滤波器

**中图分类号:** TN65

**文献标识码:** A

## Design of SAW RF Filter with Unbalanced-Input and Balanced-Output Structure

DU Xuesong, JIN Zhong, CHEN Tingting, LUO Shanyan, YAO Yuan, XIAO Li, CAO Liang

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** The SAW RF filters with unbalance-input and balance-output structure have to be used in the circuit in some applications. A Crf+Resonator hybrid SAW RF filter with unbalance-input and balance-output structure has been designed by using ADS design based on the mixed-mode S parameter of 3-port network and combining with COM model for SAW devices in this paper. The simulation results of SAW filter are agreed well with the simulation results.

**Key words:** unbalanced-balanced; mixed-mode S parameter; sawfilter

### 0 引言

差动放大器可抑制共模信号, 提高信噪比, 因而广泛应用于接收射频电路中。为使单端输入、输出滤波器和接收电路中的差动放大器相连接, 需在其间连接一个分立式的巴伦, 但这将增加电路的体积和成本, 因此, 最好采用不平衡输入-平衡输出结构的滤波器取缔分立的巴伦器件。声表面波(SAW)滤波器除了具有体积小, 质量轻, 高矩形度, 高带外抑制等特点, 还可做到电信号不平衡输入-平衡输出, 因此具有电信号不平衡输入-平衡输出功能的 SAW 滤波器在差分电路里得到广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。

### 1 不平衡输入-平衡输出网络混合模 S 参数的原理

图 1 为三端口单端输入输出网络。 $a_n, b_n, i_n, V_n, Z_n$  分别为端口  $n(n=1, 2, 3)$  的入射波, 反射波, 端口电流, 端口电压, 特性阻抗, 其关系为

$$a_n = \frac{V_n + i_n \times Z_n}{2 \times \sqrt{\text{Re}(Z_n)}} \quad (1)$$

$$b_n = \frac{V_n - i_n \times Z_n^*}{2 \times \sqrt{\text{Re}(Z_n)}} \quad (2)$$

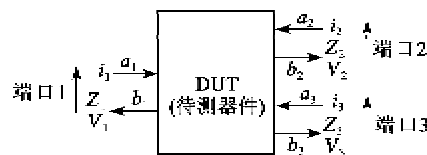


图1 三端口单端输入-输出网络

根据 S 参数的定义可得

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

图 2 为三端口不平衡输入-平衡输出网络, 这种网络简称巴伦网络, 该网络包含了单端模式, 差分模式, 共模模式的信号。

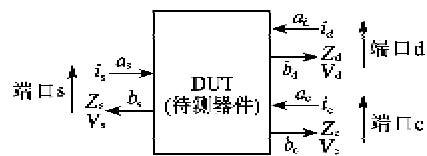


图2 三端口不平衡输入-平衡输出网络

收稿日期: 2013-01-22

基金项目: 重庆市国际科技合作基地基金资助项目(cstc2011gh240001)

作者简介: 杜雪松(1980-), 男, 重庆人, 工程师, 主要从事声表面波滤波器的设计的研究。E-mail: 55883644@qq.com。

在这种网络模型里,可把单端端口看作端口 1,差分端口和共模端口看作一个端口 2,只不过端口 2 的信号同时包含了差模信号和共模信号。定义差模端口和共模端口的端口电流、端口电压、端口阻抗、入射波、反射波<sup>[3]</sup>为

差模端口电流

$$i_d = \frac{i_2 - i_3}{2} \quad (4)$$

差模端口电压

$$V_d = V_2 - V_3 \quad (5)$$

差模阻抗

$$Z_d = V_d / i_d \quad (6)$$

差模入射波

$$a_d = \frac{V_d + i_d \times Z_d}{2 \times \sqrt{\text{Re}(Z_d)}} \quad (7)$$

差模反射波

$$b_d = \frac{V_d - i_d \times Z_d^*}{2 \times \sqrt{\text{Re}(Z_d)}} \quad (8)$$

共模端口电流

$$i_c = i_2 + i_3 \quad (9)$$

共模端口电压

$$V_c = \frac{V_2 + V_3}{2} \quad (10)$$

共模阻抗

$$Z_c = V_c / i_c \quad (11)$$

共模入射波

$$a_c = \frac{V_c + i_c \times Z_c}{2 \times \sqrt{\text{Re}(Z_c)}} \quad (12)$$

共模反射波

$$b_c = \frac{V_c - i_c \times Z_c^*}{2 \times \sqrt{\text{Re}(Z_c)}} \quad (13)$$

定义  $Z_{0o}$ ,  $Z_{0e}$ ,  $Z_0$  是系统的奇模阻抗、偶模阻抗、特性阻抗,通常情况下:  $Z_{0o} = Z_{0e} = Z_0$ 。其中差模阻抗、共模阻抗、特性阻抗的关系<sup>[3]</sup>为  $Z_d = 2 \times Z_{0o}$ ,  $Z_c = 0.5 \times Z_{0e}$ 。

与单端三端口网络  $S$  参数定义类似,三端口网络共模/差模模型混合模  $S$  参数定义如下

$$\begin{bmatrix} b_s \\ b_d \\ b_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{ss11} & S_{sd12} & S_{sc12} \\ S_{ds21} & S_{dd22} & S_{dc22} \\ S_{cs21} & S_{cd22} & S_{cc22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_s \\ a_d \\ a_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

根据单端三端口  $S$  参数的定义和混合模  $S$  参数的定义,这两种  $S$  参数之间的关系<sup>[4]</sup>为

$$\begin{bmatrix} S_{ss11} & S_{sd12} & S_{sc12} \\ S_{ds21} & S_{dd22} & S_{dc22} \\ S_{cs21} & S_{cd22} & S_{cc22} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} s_{11} & \frac{s_{12} - s_{13}}{\sqrt{2}} & \frac{s_{12} + s_{13}}{\sqrt{2}} \\ \frac{s_{21} - s_{31}}{\sqrt{2}} & \frac{s_{22} - s_{23} - s_{32} + s_{33}}{2} & \frac{s_{22} + s_{23} - s_{32} - s_{33}}{2} \\ \frac{s_{21} + s_{31}}{\sqrt{2}} & \frac{s_{22} - s_{23} + s_{32} - s_{33}}{2} & \frac{s_{22} + s_{23} + s_{32} + s_{33}}{2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $S_{ss11}$ ,  $S_{sd12}$ ,  $S_{sc12}$ ,  $S_{cs21}$ ,  $S_{cd22}$  描述了三端口不平衡输入-平衡输出网络工作在共模状态下的频响特性;  $S_{ss11}$ ,  $S_{sd12}$ ,  $S_{ds21}$ ,  $S_{dd22}$  描述了该网络工作在差模状态下的频响特性。差模信号平衡特性的幅度不平衡性  $A_1$  及相位不平衡性  $\Phi_1$  描述为

$$A_1 = 20 \log(s_{12}/s_{13}) \quad (16)$$

$$\Phi_1 = 180^\circ - \left| \tan^{-1} \frac{\text{Im}(s_{12}/s_{13})}{\text{Re}(s_{12}/s_{13})} \right| \quad (17)$$

## 2 不平衡输入-平衡输出 SAW 滤波器设计

图 3 为一个 Crf+Resonator 混合结构的不平衡输入-平衡输出 SAW 滤波器,其中 Crf\_a 和 Crf\_b 的中间换能器的极性上下翻转,Resonator\_a 和 Resonator\_b 结构完全相同,不平衡端口 1 阻抗为  $50 \Omega$ ,平衡输出端口 2 和端口 3 的阻抗也是  $50 \Omega$ 。为了让从端口 1 到端口 3 的信号与从端口 1 到端口 2 的信号相位相反,将 Crf\_a 结构中的中间换能器进行了上下翻转的处理。

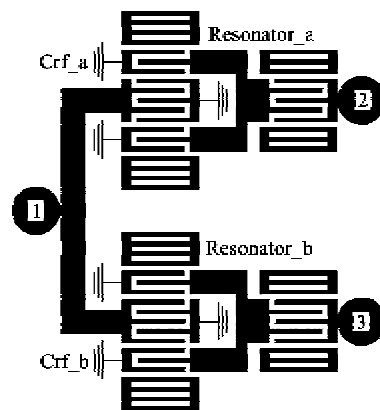


图 3 Crf+Resonator 混合结构的不平衡输入-平衡输出 SAW 滤波器

图 4 为 Crf+Resonator 混合结构的不平衡输入-平衡输出 SAW 滤波器的在 ADS 软件中的电路拓扑结构,Term1, Term2, Term3 分别对应图(3)中的端口 1,端口 2,端口 3,且端口阻抗为  $50 \Omega$ ;二

端口网络图标 port1\_port2 表示图(3)中 Crf\_a+Resonator\_a(即从端口1到端口2)的二端口S参数;二端口网络图标 port1\_port3 表示图(3)中 Crf\_b+Resonator\_b(即从端口1到端口3)的二端口S参数。

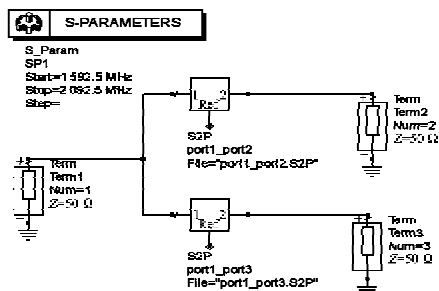


图4 Crf+Resonator混合结构的不平衡输入-平衡输出 SAW滤波器ADS电路结构

让这个三端口网络的3个端口依次接50Ω电阻,求剩下2个端口的网络参数。

1) 如图5所示,将端口3接上50Ω电阻,将三端口网络变为只有端口1、2的二端口网络,通过计算得到该网络的S参数( $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ )。由于端口1到端口2是互易网络,所以  $S_{12} = S_{21}$ 。

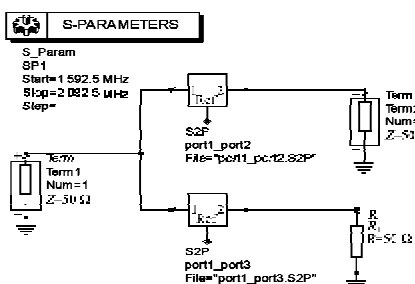


图5 计算滤波器网络端口1到端口2的S参数

2) 如图6所示,将端口2接上50Ω电阻,将三端口网络变为只有端口1、3的二端口网络,通过计算得到该网络的S参数: $S_{11}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{31}$ ,  $S_{33}$ 。由于端口1到端口2的信号与端口1到端口3的信号理想处理为传输信号的倒相,所以有  $S_{13} = -S_{12}$ ,  $S_{31} = -S_{21}$ ,  $S_{33} = S_{22}$ 。

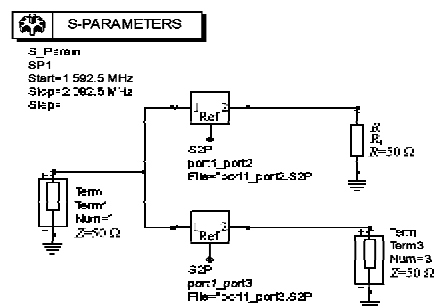


图6 计算滤波器网络端口1到端口3的S参数

3) 如图7所示,将端口1接上50Ω电阻,将三端口网络变为只有端口2、3的二端口网络,通过计算得到该网络的S参数( $S_{22}$ ,  $S_{23}$ ,  $S_{32}$ ,  $S_{33}$ )。由于端口2到端口3是互易网络,所以  $S_{23} = S_{32}$ 。

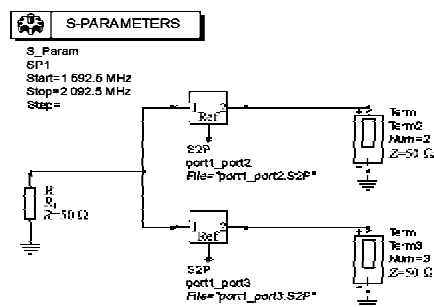


图7 计算滤波器网络端口2到端口3的S参数

综上所述可得,此滤波器单端三端口网络所有S参数,将这3组单端S参数代入式(15)得到简化后的混合模S参数为

$$\begin{bmatrix} S_{ss11} & S_{sd12} & S_{sc12} \\ S_{ds21} & S_{dd22} & S_{dc22} \\ S_{cs21} & S_{cd22} & S_{cc22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & \sqrt{2}s_{12} & 0 \\ \sqrt{2}s_{21} & s_{22} - s_{23} & 0 \\ 0 & 0 & s_{22} + s_{23} \end{bmatrix} \quad (18)$$

### 3 实验结果

采用以上介绍的方法设计了一个Crf+Resonator混合结构,输入端阻抗50Ω,平衡输出端分别为50Ω的滤波器,滤波器差模信号的仿真和测试对比如表1和图8所示,相位不平衡度和幅度不平衡性如图9、10所示。

表1 仿真和测试电性能指标对比

|    | 中心频率/<br>MHz | 插损/<br>dB | 1 dB带宽/<br>MHz | 10 dB带宽/<br>MHz |
|----|--------------|-----------|----------------|-----------------|
| 仿真 | 1 832.5      | 1.73      | 87.2           | 124.1           |
| 测试 | 1 831.4      | 1.58      | 84.4           | 124.4           |

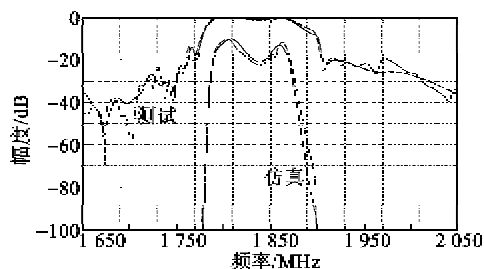


图8 仿真和测试频响曲线对比

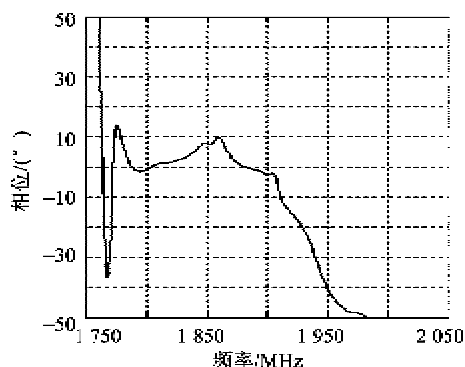


图9 相位不平衡度测试图

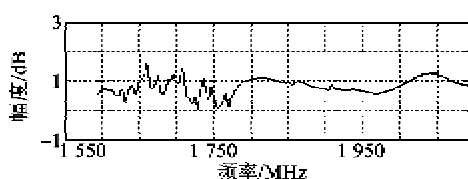


图10 幅度不平衡性测试图

从测试结果可看出,滤波器差模信号的测试和仿真结果接近,精度达到了设计要求。实际上由于芯片制作工艺和键合线非理想对称性原因,造成器件端口1信号到端口2和端口3的2路信号相位差偏离设计的 $180^\circ$ ,所以相位不平衡度和幅度不平衡也不为理想的0。

(上接第319页)

果,使合格率提升到95%,已成功用于亚微米线宽高频SAW器件生产,低浓度过氧化氢清洗液兆声清洗大量节约了化学品,去离子水的消耗量减少了86%,这不仅降低了成本,且降低了对环境的污染。

## 5 结束语

利用兆声清洗技术清洗后,晶圆表面粘附的颗粒已大幅度降低,颗粒从晶圆表面脱落后,进入兆声槽内清洗液中,循环过滤清洗液带走溶液中的颗粒,

(上接第324页)

- [9] LU Y, YE L, SU Z. Quantitative assessment of through-thickness crack size based on lamb wave scattering in aluminium plates[J]. NDT & E International, 2008, 41(1): 59-68.
- [10] 郑祥明, 杨齐, 郝国法, 等. 金属薄板中缝类缺陷的Lamb波检测[J]. 无损检测, 2007, 29(21): 630-633.
- ZHENG Xiangming, YANG Qi, HAO Guofa, et al. Nondestructive testing of slot defects in steel sheet by Lamb wave[J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(21):

## 4 结束语

本文根据三端口不平衡输入-平衡输出网络的混合模S参数的原理,结合SAW器件原理,建立了不平衡输入-平衡输出SAW滤波器的设计模型,通过实验验证了测试结果和仿真结果频率响应基本吻合。本文建立的设计模型还可用于其他种类的不平衡输入-平衡输出滤波器的设计。

## 参考文献:

- [1] HEIWAY J, KONDRATIEV S N, PLESSKY V P. Balanced bridge SAW impedance element filters[J]. IEEE Ultrasonics Symp, 1994: 27-30.
- [2] ENDOH G, UEDA M, KAWACHI O, et al. High performance balanced type SAW filters in the range of 900 MHz and 1.9 GHz[C]//S. I.; Proc of IEEE Ultrasonics Symposium, 1997: 41-44.
- [3] BOCKELMAN D E, EISENSTADT W R. Combined differential and common mode scattering parameters; theory and simulation[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1997, 43(7): 1530-1539.
- [4] 朱强, 周东方. 功率合成与分配网络的混合模式S参数分析方法[J]. 信息工程大学学报, 2003(2): 5-8.

使颗粒不再沉积在表面上。该清洗技术已成功应用于高频声表面波器件批量生产中。

## 参考文献:

- [1] 李仁. 半导体IC清洗技术[J]. 半导体技术, 2003, 28(9): 44-47.
- [2] LESTER M A. A glimpse into megasonic cleaning[J]. Semiconductor, 2003(9): 38.
- [3] 刘玉玲. 微电子工艺中的清洗技术[J]. 洗净技术, 2003(7): 15-19.
- 630-633.
- [11] 丁辉. 计算超声学[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 45-59.
- [12] 孙虎, 周丽. 基于谱元法的符合材料裂纹梁Lamb波传播特性研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14): 112-116.
- SUN Hu, ZHOU Li. Lamb wave propagation investigation in a composite cracked beam based on spectral finite element method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(14): 112-116.